КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Т. XII 1974 Вып. 6

А. М. Зверева, А. Б. Северный, Э. И. Терез

ИЗМЕРЕНИЯ ЯРКОСТИ ЛУННОГО НЕБА НА «ЛУНОХОДЕ-2»

С помощью астрофотометра АФ-3Л, установленного на «Луноходе-2» (рис. 1), обнаружено повышенное по сравнению с ожидаемым, свечение дневного и ночного неба на Луне в ультрафиолетовой и в особенности в видимой части спектра. Избыточное свечение показывает характерный ход с зенитным расстоянием Солнца и, будучи приписано некоторой рассеивающей среде, дает отношение альбедо в видимой к альбедо в ультрафиолетовой части спектра такое же, как для лунной пыли. Показано, что результаты измерений могут быть объяснены наличием очень разреженного роя пылевых частиц вокруг Луны, рассеивающего свет Солнца и Земли и, возможно, образованного в результате бомбардировки поверхности Луны метеорами.

На «Луноходе-2» был установлен астрофотометр АФ-3Л, разработанный и изготовленный в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР. За основу этого прибора взята конструкция ранее разработанного фотометра АФ-3 для внеатмосферных измерений, успешно работавшего на околоземных орбитах, на спутниках «Космос-51», «Космос-213» (см. [1, 2]). АФ-3Л, так же как АФ-3, представляет собой двухканальный фотометр для одновременных измерений яркости неба в видимом и ультрафиолетовом участках спектра (см. рис. 1). Специально сконструированные бленды I ограничивают телесный угол до $\sim 0{,}05$ *стерад* и защищают от засветки от сторонних источников света, расположенных под углом более 40° к оси прибора. Зависимость ослабления рассеянного света от угла между направлением падения луча на бленду и осью прибора специально рассчитывалась и измерялась на спектрографе солнечного телескопа КрАО. Она показывает, что для угла 30° ослабление около 10^4 раз, а для 40° уже около $5 \cdot 10^5$ раз и далее очень быстро возрастает.

Так как АФ-3Л установлен на «Луноходе-2» строго вертикально и всегда (с точностью до крена и дифферента) направлен в местный зенит, особое внимание было обращено на то, чтобы посторонние источники света — слабонаправленная и остронаправленная антенны не вносили рассеянного света. Первая антенна была видна из АФ-3Л под углом 38° и не вносила помех, бо́льших шумов телеметрии, вторая отводилась в сторону. Это проверялось путем разворота лунохода так, чтобы обе антенны попадали в тень панели солнечных батарей: отсчеты телеметрии до и после установки антенн в тень были одинаковыми.

Распределение чувствительности прибора АФ-3Л по полю зрения определялось экспериментально по удаленному лабораторному источнику света. Поле зрения (определяемое падением чувствительности в 2 раза) составляет 12,5° для видимого и 17,4° для ультрафиолетового канала соответственно.

Работа прибора реализуется с помощью дискретных поворотов на 90° (каждые 3 *сек*) программного диска II, что дает последовательность измерений: свет неба (большое отверстие в диске) — световой стандарт — ослабленный свет неба (малые отверстия в диске) — темновой ток фото-

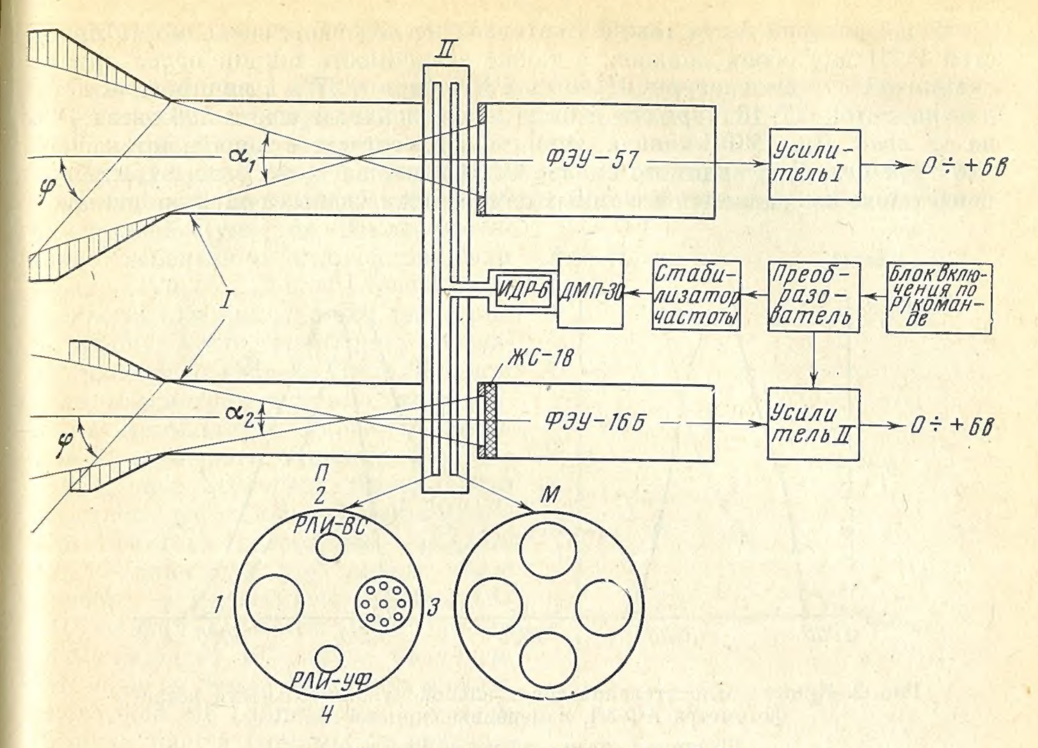


Рис. 1. Блок-схема астрофотометра АФ-3Л

умножителя. Весь цикл занимает 12 *сек*. В качестве световых стандартов применялись радиолюминесцентные источники (РЛИ) для видимого (ВС) и ультрафиолетового света (УФС): когда РЛИ для ВС стоит против катода УФС, измеряется темновой ток в УФ-канале и соответственно при установке РЛИ для УФС против катода ВС измеряется темновой ток ВС-канала. Непрерывно вращающийся диск *М* модулирует световой поток с частотой 147 *гц*. Светоприемниками являются фотоумножители ФЭУ-16Б и ФЭУ-57 для ВС- и УФС-каналов соответственно. В канале ВС устанавливался также светофильтр ЖС-18, чтобы сделать спектральную характеристику канала близкой к фотометрической системе *V* (визуальных звездных величин).

Электронная часть фотометра состоит из преобразователя напряжения, усилителей фототоков, блока стабилизации частоты модуляторного диска *М* (расположенного в программном блоке II) и блока включения и выключения прибора АФ-3 по радиокомандам.

Абсолютные спектральные характеристики прибора АФ-3Л определялись на установке типа источник света — монохроматор. В видимой области спектра использовалась ленточная вольфрамовая лампа СИ-10-300У, калиброванная в диапазоне 4700—7500 Å по эталону ВНИИМ, и затем измерялись характеристики монохроматора (см. [3]). В УФ-области спектра, от 2000 до 3500 Å, распределение энергии на выходе установки источник света (водородная лампа ВСФУ-3) — монохроматор было определено по люминесценции раствора родамина *B* в этиленгликоле, имеющем постоянный квантовый выход в этой области спектра. Кривые относительной спектральной чувствительности приведены на рис. 2. Видно, что для ВС-канала $\lambda_{эфф}=5400$ Å и полуширина $\Delta\lambda=700$ Å, а для УФС-канала $\lambda_{эфф}=2700$ Å и $\Delta\lambda=730$ Å. Абсолютная чувствительность была практически одинакова для обоих каналов для указанных $\lambda_{эфф}$ и составляла $4{,}2 \cdot 10^{-6}$ *эрг/см²·сек* на 1 *в*.

В лаборатории были также тщательно исследованы зависимость яркостей РЛИ для обоих каналов, а также зависимость ширин полос пропускания $\Delta\lambda$ от температуры. Яркость РЛИ (при $+27°$) в видимой области давала поток $3{,}7 \cdot 10^{-5}$ *эрг/сек* и была эквивалентна яркости 296 звезд 10^m на *кв. град*. Для УФС-канала (при $+23°$) соответствующий поток $9{,}6 \cdot 10^{-5}$ *эрг/сек*. Для видимого канала РЛИ и шкала вольт были откалиброваны также из сравнения наземных измерений звездных полей на одинаковых зенитных расстояниях (см. [1]), откуда получено для яркости РЛИ значение 267 звезд 10^m на *кв. град* в согласии с лабораторной калибровкой.

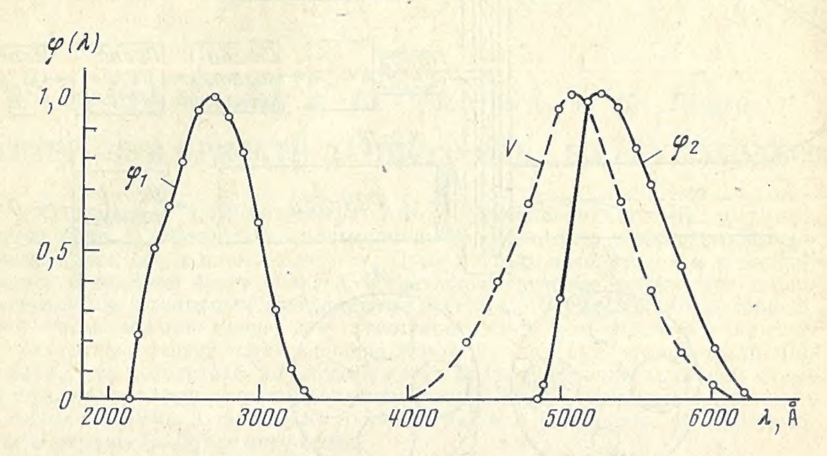


Рис. 2. Кривые относительной спектральной чувствительности астрофотометра АФ-3Л, измеренные при $t=+24°$ С

Штриховая линия — визуальная система V

За время, начиная с посадки «Лунохода-2», с 16.I по 20.III 1973 г. было проведено 12 сеансов связи с прибором АФ-3Л. Из них 9 выполнены в течение лунного дня, 2 — во время лунной ночи и 1 — в лунные «сумерки», когда верхний край Солнца опустился под горизонт на 1°. При всех дневных сеансах наблюдалось зашкаливание аппаратуры в канале ВС и вполне определенные отметки в канале УФС (всегда также телеметрия показывала хорошие отметки РЛИ и темнового тона в обоих каналах). Зашкал в канале ВС означает, что яркость «дневного» неба (когда фотометр находился в тени панели солнечных батарей) на Луне более 4400 единиц (звезд 10^m/*кв. град*), или интенсивность излучения более $6{,}67 \cdot 10^{-6}$ *эрг/см²·сек·стерад*·Å. Остановимся сначала на результатах измерений в канале ВС.

Наиболее интересными оказались измерения в сумеречных условиях (через 30 *час* после остановки лунохода), когда уверенно были зарегистрированы телеметрические сигналы в обоих каналах ВС и УФ. В ВС-канале отсчет был в ~35 раз больше РЛИ (от малого отверстия — 3,6 *в*). С учетом зависимости яркости РЛИ от температуры это дает полный поток $1{,}19 \cdot 10^{-3}$ *эрг/сек*, или интенсивность $1{,}33 \cdot 10^{-2}$ *эрг/сек·см²·стерад* во всей V-полосе пропускания, чему соответствует яркость 9900 единиц, т. е. величина в ~10 раз бо́льшая, чем самые яркие участки ночного неба при наблюдениях с поверхности Земли (граница света и тени при этом измерении находилась на высоте 260 *м* над АФ-3Л).

В течение двух ночных сеансов (через 6 суток после восхода и за сутки до восхода) ввиду очень низкой температуры на АФ-3Л и медленного вращения программного диска, сделано только одно измерение светимости неба за отведенное короткое время сеанса. С учетом температурного хода яркости РЛИ получена интенсивность $4{,}35 \cdot 10^{-4}$ *эрг/см²·сек·стерад*, или яркость 352 единицы, вместо ожидаемой в данном участке неба (созвездие Малого Льва) яркости 107 единиц (с учетом яркости зодиакального света).

Таким образом, вопреки общепринятому мнению, несомненным является заключение о высокой, заметно выше ожидаемой, яркости лунного неба в видимых лучах как днем, так и ночью.

По-видимому, это общепринятое мнение не учитывало того обстоятельства, что из-за по крайней мере в 40 раз большей яркости Земли на Луне, чем полной Луны на Земле, достаточно небольшого количества пыли между Луной и Землей, освещенной Солнцем, или наклона оси телескопа в сторону Земли, чтобы дать довольно яркий фон неба на Луне. В самом деле, рассмотрим влияние света Земли на результаты сеанса наблюдений в «сумерки». Яркость Земли в этом сеансе (с учетом фазы 0,30 и зенитного расстояния Земли $z=34{,}4°$ или фактора ослабления, равного $1{,}8 \cdot 10^4$ для угла 34,4° между осью прибора и источником) равна $8{,}3 \cdot 10^5$ единиц. С учетом поля зрения (122 *кв. град*) ВС-канала получаем, что яркость Земли может составлять около $6{,}85 \cdot 10^3$ единиц, или с учетом отличия нашей системы от визуальной $5{,}25 \cdot 10^3$ единиц, т. е. около 53% фактически наблюдаемой яркости. Во время ночного сеанса, как показывает расчет, привнос Земли из-за рассеяния ее света в АФ-3Л эквивалентен добавочной яркости ~125 единиц. Таким образом, в измеренную яркость ночного неба (352 единиц) входит, кроме звезд и зодиакального света (107 единиц), и 125 единиц засветки от Земли еще сторонняя засветка ~120 единиц, близкая к ожидаемой яркости неба.

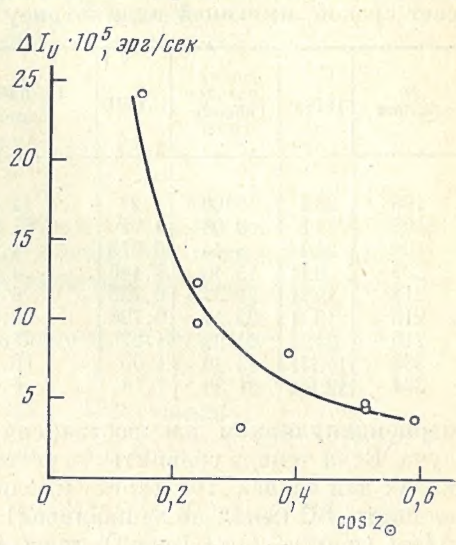


Рис. 3. Зависимость избытка ультрафиолетового излучения от $\cos z_\odot$

Обратимся теперь к результатам измерений в канале УФС; они собраны в таблице. Здесь для всех дневных сеансов (кроме 109 — сумеречного) приведены отсчеты в УФС-канале (в единицах отсчета РЛИ) U/РЛИ, которые затем переведены в поток I_U с учетом того, что поток от РЛИ равен $9{,}6 \cdot 10^{-5}$ *эрг/сек* при $t=23°$, с учетом хода яркости РЛИ с температурой (температура на АФ-3Л для каждого сеанса известна из показаний телеметрии). Ожидаемый поток был вычислен из соотношения для яркостей

$$B_U(\text{ожид}) = B_V(\text{виз}) \frac{\int \varphi_1(\lambda) f(\lambda)\, d\lambda}{\int V(\lambda) f(\lambda)\, d\lambda} = 0{,}0935 \cdot B_V(\text{виз}), \qquad (1)$$

где B_V — яркость наблюдаемого участка неба в визуальной области (в принятых нами единицах числа звезд 10^m на *кв. град*, 1 ед. яркости $B_V = 1{,}34 \cdot 10^{-6}$ *эрг/см²·сек·стерад*), $\varphi_1(\lambda)$ — распределение чувствительности УФС-канала (кривая φ_1 на рис. 2), $V(\lambda)$ — кривая видимости, $f(\lambda)$ — распределение энергии в спектре Солнца (считаем, что средний спектральный состав излучения звездных площадок такой же, как у Солнца). Таким образом, $I_U(\text{ожид}) = B_U(\text{ожид}) \cdot s_U \omega_U \cdot 1{,}34 \cdot 10^{-6}$ *эрг/сек*, где s_U и ω_U — площадь катода и телесный угол для УФС-канала. На рис. 3 приведены разности наблюдаемых I_U и ожидаемых в зависимости от $\cos z_\odot$ ($z_\odot$ — зенитное расстояние Солнца).

Из рис. 3 видно, что яркость неба в УФС-канале систематически больше ожидаемой яркости, однако различие не столь сильное, как в видимой области. Наиболее важным в УФС-измерениях является характерный ход избыточного свечения с зенитным расстоянием (убывание свечения с $\cos z_{\odot}$). В то же время оно не показывает никакой зависимости от $\cos z_{\oplus}$ ($z_{\oplus}$ — зенитное расстояние Земли). Это веское указание на то, что избыточное свечение лунного неба связано с какой-то рассеивающей солнечный свет средой, имеющей индикатрису рассеяния, вытянутую в направлении,

№ сеанса	1973 г.	Время среднее (московское)	U/РЛИ	I_U(набл)·10⁵, *эрг/сек*	I_U(ожид)·10⁵, *эрг/сек*	$\Delta I_U \cdot 10^5 = [I_U$(набл) — I_U(ожид)]·10⁵, *эрг/сек*
108	23.I	0^h08^m	1,27	14,0	1,54	12,4
108	23.I	0 08	1,02	11,3	1,54	9,76
109	24.I	8 44	0,312	4,68	1,42	3,26
202	9.II	15 10	0,445	4,83	1,61	3,22
213	19.II	22 57	0,728	6,36	1,81	4,55
213	19.II	22 57	0,708	6,66	1,81	4,85
215	21.II	01 32	4,27	25,8	1,61	24,2
303	11.III	15 10	1,06	10,4	2,38	8,02
304	12.III	21 30	1,18	6,46	2,58	3,88

перпендикулярном распространению света, больше, чем в направлении луча. Если теперь сравнить энергетические освещенности в ВС- и УФС-каналах для сеанса 109 (когда имелись одновременные показания в обоих каналах, ВС-канал не зашкаливал), то можно для обоих каналов найти $\Delta I = I$ (набл) $- I_{\oplus} - I$ (ожид), где $I_{\oplus}$ — засветка от Земли (ничтожная для УФС-канала). Оказывается, что величина

$$\Delta I_V / \Delta I_U = 0{,}51 \cdot 10^2;$$

с другой стороны, это отношение

$$\Delta I_V / \Delta I_U = a_V \int \varphi_2(\lambda) f(\lambda)\, d\lambda \Big/ a_U \int \varphi_1(\lambda) f(\lambda)\, d\lambda, \tag{2}$$

где φ_1, φ_2 — кривые реакции (рис. 2), а a_U и a_V — альбедо среды, дающей избыточную засветку, в УФС- и ВС-каналах. Так как отношение интегралов в (2) равно 8,50, то

$$a_V / a_U = 6{,}0, \tag{3}$$

что явно не соответствует значению этого отношения для Земли (~300) и хорошо соответствует значению для лунной пыли ($a_U = 2\%$, $a_V = 11\%$, см. [4]). Это обстоятельство является дополнительным свидетельством того, что избыточная светимость в ВС- и УФС-каналах может быть связана с рассеянием света Солнца на пылевых частицах, поднятых с поверхности Луны. [1]

Ход избыточного свечения в УФС-канале (рис. 3) хорошо согласуется с тем, который следует из индикатрисы рассеяния $\varkappa(\gamma)$ ($\gamma = z_{\odot}$) лунной пыли, полученной в [5]. Если рассмотреть теперь плоскопараллельный рассеивающий слой высотой h_0 над поверхностью Луны, то нетрудно видеть, что на фотокатод от одной пылинки упадет поток рассеянного света

$$A \frac{\varkappa(\gamma)}{4\pi} \varepsilon \sigma \Delta\omega = \frac{A \varepsilon \sigma s}{h^2 + r^2} \frac{\varkappa(\gamma)}{4\pi}, \tag{4}$$

[1] Заметим, что измеренное нами излучение в УФС-канале является действительно излучением источника, а не эффектом просачивания видимого (сильного) излучения в «хвосте» чувствительности ФЭУ в УФС-канале. Привнос в «хвосте» не более 20% от излучения, входящего в основную полосу УФС.

где A — альбедо пылинки, r — ее расстояние от оси прибора, а h — высота слоя, s — площадь фотокатода (3,14 и 7,07 *см*² для ВС и УФС соответственно), $\sigma = \pi d^2/4$, d — размер пылинки, ε — солнечная постоянная. Если концентрация пыли — $n(h)$ (*см*⁻³), то полное количество света получим интегрированием (4) по всему объему конуса высотой h_0 с угловым раствором $2\beta_0$. Так как элемент объема — $dV = 2\pi r dr dh$, то для избыточного свечения имеем

$$\Delta F = A \varepsilon \sigma \frac{\varkappa(\gamma)}{4\pi} s \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{h_0} n(h) \int_0^{h \operatorname{tg} \beta_0} \frac{r\, dr\, dh}{r^2 + h^2} \approx \approx A \varepsilon \sigma \bar{n} h_0 \frac{s}{4} \overline{\varkappa(\gamma)} \operatorname{tg}^2 \beta_0 \quad (\textit{эрг/сек}), \tag{5}$$

так как β_0 — угол малый (6,2 и 8,7° для ВС- и УФС-каналов соответственно); принято также, что плотность n постоянна (за неимением никаких данных о ней), и среднее $\varkappa$ выносим за интеграл (γ мало отличается от половины угла растворения конуса).

Для сумеречного сеанса мы имеем из измерений (с учетом света Земли, рассеянного в АФ-3Л)

$$\Delta F = \begin{cases} 2{,}94 \cdot 10^{-5} \ \textit{эрг/сек} & \text{УФС-канал} \\ 3{,}46 \cdot 10^{-4} \ \textit{эрг/сек} & \text{ВС-канал.} \end{cases} \tag{6}$$

Поэтому, подставляя в (5) $\operatorname{tg} \beta_0 = 0{,}15$ и 0,11 для УФС- и ВС-каналов, $\varkappa(\gamma) = 0{,}82$ (согласно [5] для $\gamma = 90°$), находим

$$\Delta F_U = 11{,}6\tau, \quad \Delta F_V = 1{,}24 \cdot 10^2 \tau,$$

где $\tau = n\sigma h_0$ — оптическая толща. Отсюда, согласно (6), среднее значение

$$\tau = 2{,}67 \cdot 10^{-6} \tag{7}$$

и для частиц, наиболее распространенных в лунном грунте, с размером $d = 10$ *мкм* находим $nh_0 = 3{,}4$ *см*⁻², а для $d = 70$ *мкм* $nh_0 = 0{,}069$ *см*⁻² (о размерах частиц см. [6, 7]).

Если характерный размер рассеивающего слоя h_0 сравним с расстоянием от Земли до Луны, то для плотности получим $n \approx 8{,}8 \cdot 10^{-10}$ и $\approx 1{,}8 \cdot 10^{-12}$ *см*⁻³ для $d = 10$ и 70 *мкм* соответственно. Последнее значение всего в 10 раз выше плотности межпланетной метеорной пыли на расстоянии в 1 а.е. Если h_0 — порядка высоты «убегания» ($1{,}8 \cdot 10^8$ *см*), то для крупных частиц (70 *мкм*) величина n будет $\sim 3{,}9 \cdot 10^{-10}$ на 3 порядка выше плотности метеоров на указанном расстоянии. Нетрудно убедиться, что при найденных плотностях свечение у поверхности Луны (по касательной) будет столь ничтожно, что не будет заметно (контраст у края Луны $\sim 10^{-7}$).

В работах [8—10] отмечается возможность образования пылевого роя, облака вокруг Луны из выброшенных под воздействием метеорных ударов частиц с поверхности Луны, причем отмечается, что плотность выброшенных частиц в 10^3—10^4 раз может превосходить плотность метеорного вещества межпланетной среды. В [11] отмечается также, что пыль может подниматься над поверхностью Луны вследствие процесса «левитации» — электризации ее под действием рентгеновских лучей Солнца и подъема на небольшую высоту (~30 *см*), определяемую равенством электрической силы и силы притяжения. Этот тонкий пылевой слой вызывает узкую и протяженную световую полоску после захода Солнца, наблюденную на станциях «Сервейор» [12]. Неясным остается вопрос о возможном увлечении этих частиц солнечным ветром на большие высоты в результате процесса, описанного в [13]. Свидетельством пылевой атмосферы на Луне

являются наблюдения команды «Аполлона-17» с лунной орбиты оптических эффектов лунной пылевой атмосферы [14]. Имеются также не единичные указания на наличие очень разреженной атмосферы на Луне [15, 16]. Наиболее интересное в этом отношении — яркое свечение в линии L_α над горизонтом Луны, описанное в [17].

Дата поступления
12 мая 1974 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Н. А. Димов, А. Б. Северный.* Изв. Крымской астрофиз. обс., *45*, 53, 1972.
2. *Н. А. Димов, А. М. Зверева, А. Б. Северный.* Изв. Крымской астрофиз. обс., *45*, 67, 1972.
3. *Э. И. Терез.* Изв. Крымской астрофиз. обс., *46*, 144, 1972.
4. *R. L. Lucke, R. C. Henry, W. G. Fastie.* Astron. J., *78*, No. 3, 263, 1973.
5. *А. В. Мороженко, Э. Г. Яновицкий.* Астрон. ж., *41*, 72, 1971.
6. *L. D. Jaffe, J. N. Strand.* Nature Phys. Sci., *241*, No. 107, 57, 1973.
7. *А. П. Виноградов.* Знание. Сер. «Космонавтика и астрономия», № 12, 1972.
8. *D. E. Gault, E. M. Shoemacker, H. J. Moore.* Spray Ejecta from Lunar Surface etc., NASA, TND-1767, 1963.
9. *А. П. Виноградов.* Физика Луны и планет. Междунар. симпоз. 15–22 окт. 1968, Киев. М., «Наука», 1972, стр. 20.
10. *Т. Н. Назарова, А. К. Рыбаков, Т. Д. Комиссаров.* Космич. исслед., *4*, № 6, 910, 1966.
11. *D. R. Criswell.* Proc. Third Lunar Sci. Conf., supp. 3. Geochim. cosmochim. acta, *3*, 2671, 1972.
12. *I. Renilson, D. Criswell.* Surveyor observ. of Lunar Horiz. Glow, COSPAR proceed. Session i. 17, FRG, 1973.
13. *T. Gold.* Monthly Notices Roy. Astron. Soc., *115*, 585, 1955.
14. *I. E. McCoy, D. R. Criswell.* Evidence for a lunar dust atmosphere etc., preprint
15. *C. Siscoe, N. Mukherjee.* J. Geophys. Res., *77*, 6042, 1972.
16. *F. Johnson, D. Evans, J. Carroll.* Proc. XIV COSPAR Meeting, Seattle 1971, p. 99
17. *G. Carruthers, T. Rage.* NASA Sp-315. Apollo 16 Prelim. Report, 13-13, 1972.

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Т. XII 1974 Вып. 6

Е. В. Хрунов, В. В. Шевченко, Н. Ф. Романтеев

НАБЛЮДЕНИЯ ЛУНЫ В ПОЛЕТЕ ПО ГЕОЦЕНТРИЧЕСКОЙ ОРБИТЕ

Рассматриваются три направления исследований по результатам наблюдений Луны с околоземной орбиты: в целях автономной навигации, для изучения яркостной структуры ореола земной атмосферы и для определения истинного значения альбедо лунной поверхности. Приводятся конкретные примеры подобных наблюдений и рекомендации по их выполнению.

Наблюдения Луны в околоземном космическом полете могут преследовать различные цели в области навигационных и исследовательских задач. Ниже рассматриваются три основных направления подобных наблюдений.

1. Наблюдения Луны для решения задач автономной навигации. Значительная яркость Луны и меняющаяся в процессе лунации конфигурация, что отличает ее от точечного небесного объекта, создают благоприятные условия для навигационных определений по Луне. В периоды от новолуния до первой четверти удобно пользоваться способом определения географических координат места КК по положению лунного серпа над горизонтом (лимбом) Земли. Принципиальная основа способа заключается в том, что высота и ориентация линии рогов Луны относительно горизонта зависят от географических координат наблюдателя и высоты полета. Полагая, что высота над поверхностью Земли может определяться независимо, сводим задачу к вычислению широты и долготы места космического корабля. На рис. 1 в сферической системе координат представлены наблюдаемые и вычисляемые угловые элементы. Использованы следующие обозначения: $P_\oplus$ — полюс Земли, $O_☾$ — проекция центра видимого диска Луны, $P_☾$ — проекция полюса Луны, $\smile O_☾ R$ — проекция линии рогов, K — положение космического корабля, M_K — место корабля, λ_K, φ_K — географические координаты места корабля, $\smile P_\oplus O$ — нулевой географический меридиан, $\delta_☾^K$ — склонение Луны на момент наблюдений, $\lambda_☾^K$ — долгота Луны, T — позиционный угол линии рогов, q, N, Q — вспомогательные углы.

Из сферического треугольника $O_☾ P_\oplus M_K$

$$\sin\varphi_K = \cos Q \sin\delta_☾^K + \sin Q \cos\delta_☾^K \cos q,$$

$$\cos(\lambda_K - \lambda_☾^K) = \frac{\cos Q - \sin\varphi_K \sin\delta_☾^K}{\cos\varphi_K \cos\delta_☾^K}. \quad (1)$$

Знак K в формулах (1) указывает на то, что данные величины должны быть исправлены за параллактическое смещение в результате перехода от геоцентрической к «топоцентрической» (с центром в точке положения корабля) системе координат. Тогда

$$\delta_☾^K = \delta_☾ + \Delta\delta_☾,$$

где $\delta_☾$ — склонение Луны, которое выбирается из соответствующих таблиц Астрономического ежегодника на момент наблюдений. Поправка $\Delta\delta_☾$ рассчитывается по известным формулам суточного параллакса. Географическая долгота Луны определяется как разность часового угла точки весеннего равноденствия и прямого восхождения Луны:

$$\lambda_☾^K = t_\gamma - \alpha_☾^K,$$